

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХФАЗНОМ ТИРИСТОРНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ФАЗОСТУПЕНЧАТЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ

А. В. КИПЕНСКИЙ*, Е. И. КОРОЛЬ

кафедра промышленной и биомедицинской электроники, НТУ «ХПИ», Харьков, УКРАИНА

*e-mail: kavkpi@ukr.net

АННОТАЦИЯ. В работе поставлена задача создания модели трехфазного тиристорного преобразователя переменного напряжения с микропроцессорной системой импульсного управления. Для решения этой задачи были проанализированы возможности различных программных средств. В качестве основы для создания модели выбран программно-математический пакет MatLab. Предложенная модель содержит три основные части: систему энергоснабжения, силовую часть преобразователя и систему управления. Исследования преобразователя переменного напряжения с помощью модели подтвердили его работоспособность, позволили определить влияние параметров питающей сети на процессы коммутации в силовой схеме, показали, что преобразователь обладает повышенным коэффициентом мощности.

Ключевые слова: тиристорный преобразователь; трехфазная питающая сеть; программно-математические пакеты; модели; фазовые и регулировочные характеристики; энергетические показатели.

MODELLING OF PROCESSES IN THE AC-VOLTAGE THREE-PHASE THYRISTOR CONVERTER WITH PHASE-STEP REGULATION OF OUTPUT POWER

A. KIPENSKYI, I. KOROL

Department of physical and biomedical electronics, NTU "KhPI", Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT. The purpose of this work is to select software and create a model of a three-phase thyristor AC voltage converter with a microprocessor-based pulse control system. To solve this problem, the capabilities of various software tools were analyzed. The MatLab software and mathematics package was chosen as the basis for creating the model. The proposed model contains three main parts: the power supply system, the power part of the converter and the control system. Studies of the AC voltage converter using the model confirmed its performance. The model allowed to determine the effect of power supply parameters on the switching processes in the power circuit and showed that the converter has a high power factor.

Keywords: thyristor converter; three-phase mains; software and mathematical packages; models; phase and control characteristics; energy performance

Введение

Трехфазные тиристорные преобразователи переменного напряжения (ППН) находят широкое применение для регулирования температуры в электропечах сопротивления большой мощности. В тех случаях, когда необходима стабилизация температуры на заданном уровне в течение всего интервала термообработки, достаточно часто используется релейный принцип регулирования выходной мощности [1]. Однако при термической и химико-термической обработке деталей нужна не только стабилизация температуры, но и изменение ее по определенному закону [2]. Для реализации таких законов целесообразно использование принципов фазового управления, которые при определенных схемных решениях силовой части ППН и соответствующих алгоритмах управления, позволяют решать не только технологические задачи, но и улучшать энергетические показатели преобразователя [3, 4].

В процессе разработки трехфазного тиристорного ППН для электропечи сопротивления возникла

необходимость анализа характеристик и энергетических показателей преобразователя, а также проверки его работоспособности при различных алгоритмах микропроцессорного управления. Анализ процессов, происходящих в устройствах преобразовательной техники, с помощью математических расчетов является достаточно сложным и не всегда приемлем при решении практических задач. В таких случаях наиболее целесообразно использовать пакеты автоматизированного проектирования. В настоящее время разработано множество программных пакетов, позволяющих осуществлять компьютерное моделирование статических и динамических режимов работы практически любых схем.

Цель работы

Цель данной работы состояла в выборе программных средств и создании модели трехфазного тиристорного преобразователя переменного напряжения с микропроцессорной системой импульсного управления.

© А. В. Кипенский, Е. И. Король, 2019

Средства моделирования силовых электронных схем и цифровых систем управления

Достаточно широкими возможностями для моделирования электронных схем обладает пакет программ MicroSim Design Lab Release 8.0 [5]. Он позволяет создавать и моделировать схемы с выполнением различных видов анализа. Для этого можно использовать стандартные модели элементов из имеющихся библиотек, а также создавать и использовать новые модели и библиотеки элементов (в том числе функциональные блоки со сложными передаточными функциями). В состав пакета входит схемотехнический редактор, программы моделирования, системы графического представления результатов и другие программы. Анализ переходных процессов производится в схемотехническом редакторе, а результаты просматриваются в модуле Probe.

Другой, широко распространенный, программный продукт – Pspice используется в основе таких прикладных пакетов как OrCAD Realise, DesignLab, Workbench, Circuit Marker и др [6]. Для изучения и анализа несложных схем чрезвычайно привлекательным является Workbench, который по существу представляет собой виртуальную лабораторию с довольно широкими возможностями и обширной библиотекой различных электронных компонентов. Гораздо более широкими возможностями обладает пакет OrCAD, объединивший в себе возможности анализа, синтеза, расчета и конструирования электронных схем с обширной библиотекой (более 200 тыс.) электронных компонентов. Этот пакет позволяет проводить самый глубокий анализ электронных блоков, осуществлять проектирование печатных плат для разработанной и исследованной электронной схемы, создавать управляющие файлы для фотоплоттеров. Дополненный специальными пакетами (PLSyn, Max+plusII, XACTStep), пакет OrCAD позволяет синтезировать программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) типа Altera, Xilinx и другие.

Для исследования электромеханических систем с полупроводниковыми преобразователями польскими специалистами был разработан специализированный пакет ТСАД [7]. Этот пакет содержит:

- энергетическую часть, включающую различные источники энергии, электрические машины, силовые полупроводниковые преобразователи и полный набор пассивных и активных элементов силовой преобразовательной техники;
- информационную часть, включающую практически полный набор линейных и нелинейных звеньев систем управления силовыми преобразователями;
- измерительную часть, позволяющую измерить переменные состояния электромеханической системы;
- специальный графический пакет, позволяющий наблюдать осциллограммы в любых точках системы; записывать их, копировать и распечатывать;

- специальный пакет, позволяющий определить гармонический состав анализируемых сигналов.

При исследовании процессов в электронных схемах с использованием различных пакетов моделирования, одной из основных проблем является декомпозиция. Суть проблемы состоит в том, что различные процессы в преобразовательной системе имеют разный масштаб времени. Например, переходные процессы в электромеханической части системы протекают в течение десятков секунд, а электромагнитные переходные процессы при переключении силовых ключей продолжаются всего несколько микросекунд. Таким образом, разница в длительности процессов составляет несколько порядков. В настоящее время прикладные пакеты, которые позволяли бы исследовать преобразовательную систему с одновременным учетом всех переходных процессов – отсутствуют. Однако, поскольку эти процессы оказывают существенное влияние на характеристики системы, все они должны быть учтены. Решение этой проблемы базируется на разделении (декомпозиции) системы в пространстве и во времени, с обоснованным выбором на каждом шаге определенной модели, а иногда и отдельного прикладного пакета.

Задачи проектирования полупроводниковых преобразователей электроэнергии и систем автоматического управления с достаточной точностью решаются в пакете MatLab/Simulink [8, 9, 10]. В настоящее время MatLab представляет собой богатейшую библиотеку функций (их более 800), единственная проблема работы с которой – быстро отыскать те из них, которые нужны для решения поставленной задачи. Основными пакетами расширения, которые используются при исследовании полупроводниковых преобразователей переменного напряжения, являются Simulink и Power System Blockset. Пакет Simulink имеет самые широкие возможности, начиная от структурного (математического) представления системы и заканчивая генерированием кодов для программирования микропроцессора в соответствии со структурной схемой модели. Пакет Power System Blockset содержит в себе модели стандартных электронных компонентов и элементов силовой электроники.

Для быстрого построения экспериментальных установок, созданных в среде Matlab, дополнительно может быть использована станция быстрого моделирования алгоритмов управления [11]. Эта станция предоставляет широкий набор инструментов, которые позволяют произвести проверку работоспособности схемы, настройку параметров и сравнение различных алгоритмов управления.

К важным свойствам станции можно отнести вычислительную мощность, расширенный интерфейс для подключения аналоговых и цифровых устройств, возможность анализа процесса управления в реальном времени и наблюдение внутренних и внешних переменных системы, возможность программирования на языке высокого уровня, программную стыковку с па-

кетом MATLAB и графический пользовательский интерфейс.

Трехфазный тиристорный ППН и его модель в программно-математическом пакете MatLab

Схема силовой части трехфазного тиристорного ППН приведена на рис. 1. Особенностью приведенной схемы является то, что при регулировании

мощности в нагрузке одновременно используются фазные и линейные напряжения трехфазной питающей сети. Такое регулирование мощности принято называть фазоступенчатым. При этом каждое фазное напряжение одновременно сочеталось с двумя линейными – опережающим и отстающим, что позволяет получить дополнительное повышение коэффициента мощности [3, 4].

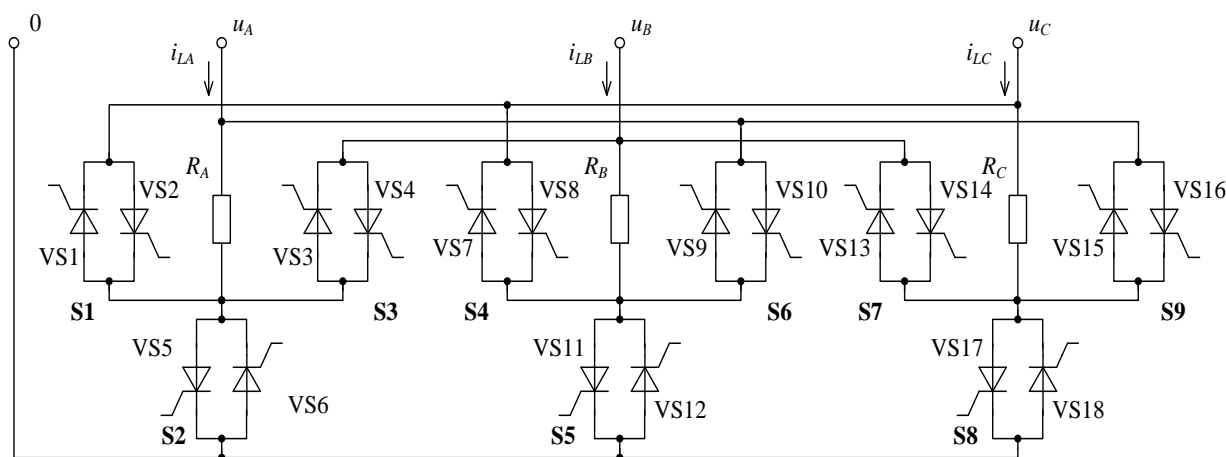


Рис. 1 – Схема силовой части трехфазного тиристорного ППН

Модель, трехфазного тиристорного ППН была разработана в программно-математическом пакете MatLab с использованием приложений Simulink и Power System Blockset. Схема модели преобразователя с микропроцессорной системой импульсного управления (МПСИУ) и измерительными блоками приведена на рис. 2.

Элементы схемы ППН рассчитывались и выбирались исходя из его номинальной мощности 100 кВА при питании от трехфазной сети переменного напряжения 380 В с частотой 50 Гц. Для улучшения читаемости схемы отдельные элементы объединены в функциональные блоки, структуры некоторых из них будут описаны ниже. В модели ППН можно выделить три основных части: система энергоснабжения, силовая часть и система управления.

Система энергоснабжения обеспечивает питание силовой части ППН переменным трехфазным напряжением 380/220 В с частотой 50 Гц и включает в себя источник трехфазного напряжения (блок Power source 6 kV, 50 Hz) с линейным напряжением 6 кВ и частотой 50 Гц и силовой трансформатор (блок DYg linear transformer). Источник трехфазного напряжения объединен в один блок с тремя индуктивностями, включенными последовательно в каждую фазу источника, которые позволяют смоделировать индуктивность линии электропередачи. Силовой трансформатор включен в схему для оценки влияния понижающего трансформатора цеховой подстанции на процессы коммутации в силовой схеме ППН. Параметры системы энергоснабжения задавались исходя из но-

минальной мощности трансформатора 1 МВА, что позволяет обеспечить электропитание не только ППН, но и других потребителей. Прототипом для модели силового трехфазного трансформатора послужил трансформатор типа ТСЗП-1000/10УЗ, со следующими параметрами:

- номинальная мощность – 1007 кВ·А;
- номинальное напряжение первичных обмоток – 6 кВ;
- номинальное напряжение вторичных обмоток – 380 В;
- потери холостого хода – 2650 Вт;
- потери короткого замыкания – 8400 Вт;
- напряжение короткого замыкания – 360 В;
- ток холостого хода – 0,5 А.

Силовая часть модели ППН (рис. 2) состоит из трех активных нагрузок (блоки Load A, Load B, Load C) номинальной мощностью 33 кВА и девяти тиристорных силовых ключей (СК) (функциональные блоки Switch 1-Switch 9). Каждый из СК выполнен на двух встречно-параллельно соединенных тиристорах со встроенными снаберами [12], входящих в состав стандартной библиотеки приложения Power System Blockset пакета MatLab. В функциональный блок каждого СК введен блок измерения его тока.

Система управления включает в себя блок расчета углов управления (функциональный блок Angles) и блок импульсно-фазового управления (функциональный блок Synchronization). В системе управления производится расчет углов управления исходя из по-

даваемого на вход N блока Angles относительного управляющего воздействия N^* и формирование отпирающих импульсов для тиристорных ключей (блоки Switch 1-Switch 9) силовой части ППН.

В соответствии с предложенным способом управления [4] выбраны моменты синхронизации системы управления с сетью и порядок отсчета углов управления, которые показаны на примере фазы А (рис. 3). Первый момент синхронизации v_1 , соответствует переходу линейного напряжения u_{AB} через нуль. От него начинается отсчет угла α_1 отпирания СК S2 (тиристоры VS5 и VS6 на рис. 1),

который подключает нагрузку к фазному напряжению u_A , и угла α_2 отпирания СК S1 (тиристоры VS1 и VS2), который подключает нагрузку к линейному напряжению u_{AC} . Второй момент синхронизации v_2 , соответствует моменту равенства линейных напряжений u_{AC} и u_{AB} . От него начинается отсчет угла α_3 отпирания СК S3 (тиристоры VS3 и VS4), который подключает нагрузку к линейному напряжению u_{AB} . В системе синхронизации этот момент определяется по совпадающему с ним моменту перехода через нуль линейного напряжения u_{CB} .

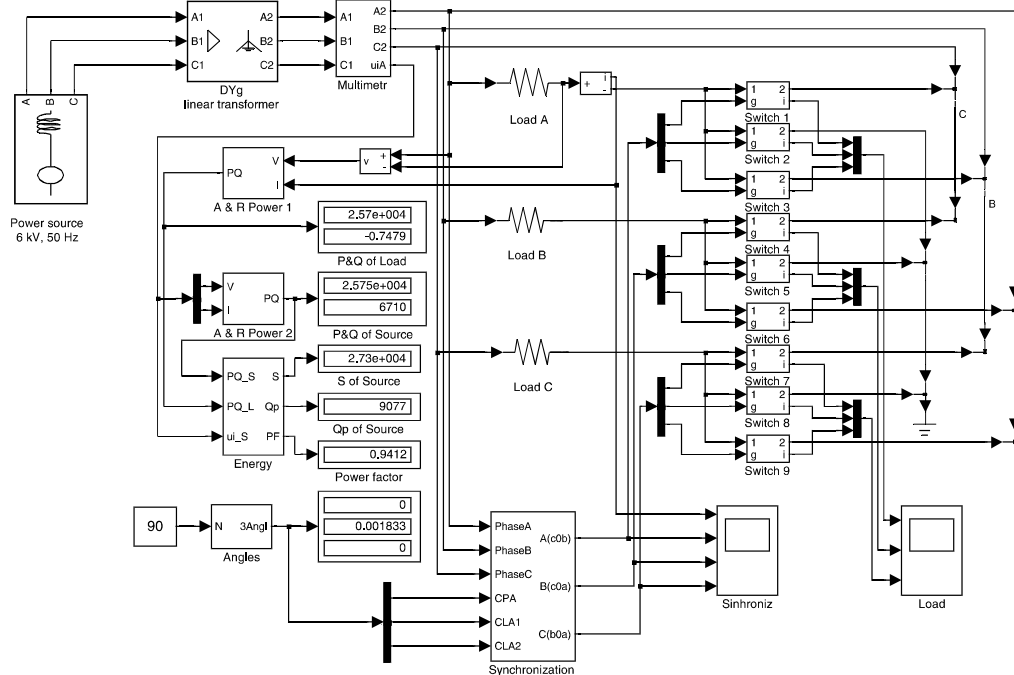


Рис. 2 – Схема модели ППН системой управления и измерительными блоками

Регулирование активной мощности P в нагрузке от максимального значения P_{\max} до нуля при заданных моментах синхронизации осуществляется последовательным поочередным изменением одного из трех углов управления при фиксированных значениях двух других углов: α_2 то 0 до $\pi/3$ при $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_3 = 0$; α_3 от 0 до $2\pi/3$ при $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_2 = \pi$ (соответствует состоянию не включения); α_1 от 0 до $5\pi/6$ при $\alpha_2 = \pi$ и $\alpha_3 = 2\pi/3$ (соответствует состоянию не включения).

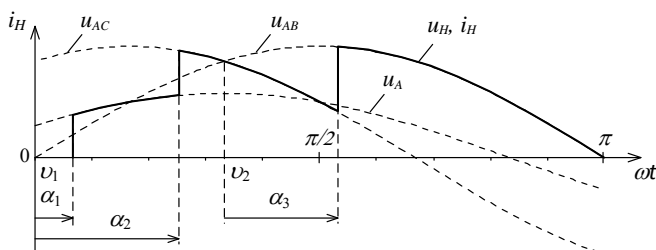


Рис. 3. – К пояснению порядка отсчета углов управления СК

При этом суммарный диапазон последовательного изменения трех углов управления $\Delta\alpha = \alpha_{2\max} + \alpha_{3\max} + \alpha_{1\max}$ составляет $11\pi/6$. Это позволяет осуществлять регулирование мощности непрерывным, линейным изменением цифрового управляющего воздействия N от нуля, когда $P = P_{\max}$, до N_{\max} , когда $P = 0$.

При автоматическом управлении изменением числа N от 0 до N_{\max} более удобно использовать инверсную (возрастающую) регулировочную характеристику, для чего значению $N = 0$ должна соответствовать мощность $P = 0$, а значению $N = N_{\max}$ – мощность $P = P_{\max}$. При этом изменения углов управления при изменении мощности от нуля до максимума должны происходить в обратном порядке: α_1 от $5\pi/6$ до нуля, α_3 от $2\pi/3$ до нуля и α_2 от $\pi/3$ до нуля. Этот способ реализован в рассматриваемой модели ППН. Расчет углов управления производится в функциональном блоке Angles (рис. 4) по заданному на входе N блока относительному управляющему воздействию $N^* = N/N_{\max}$ в четыре действия.

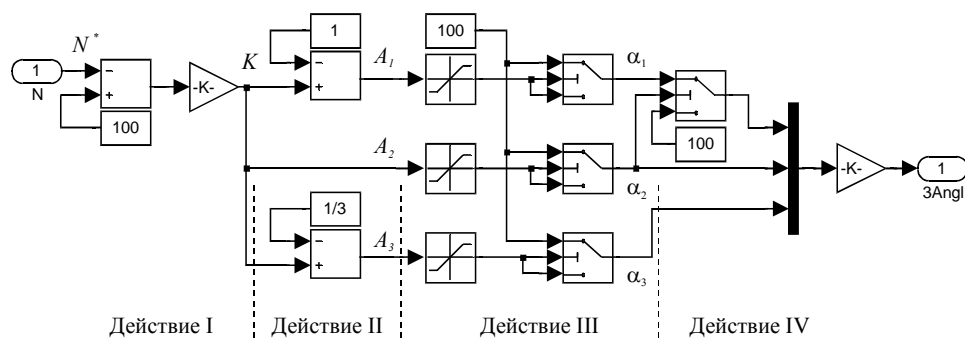


Рис. 4 – Структурная схема блока Angles

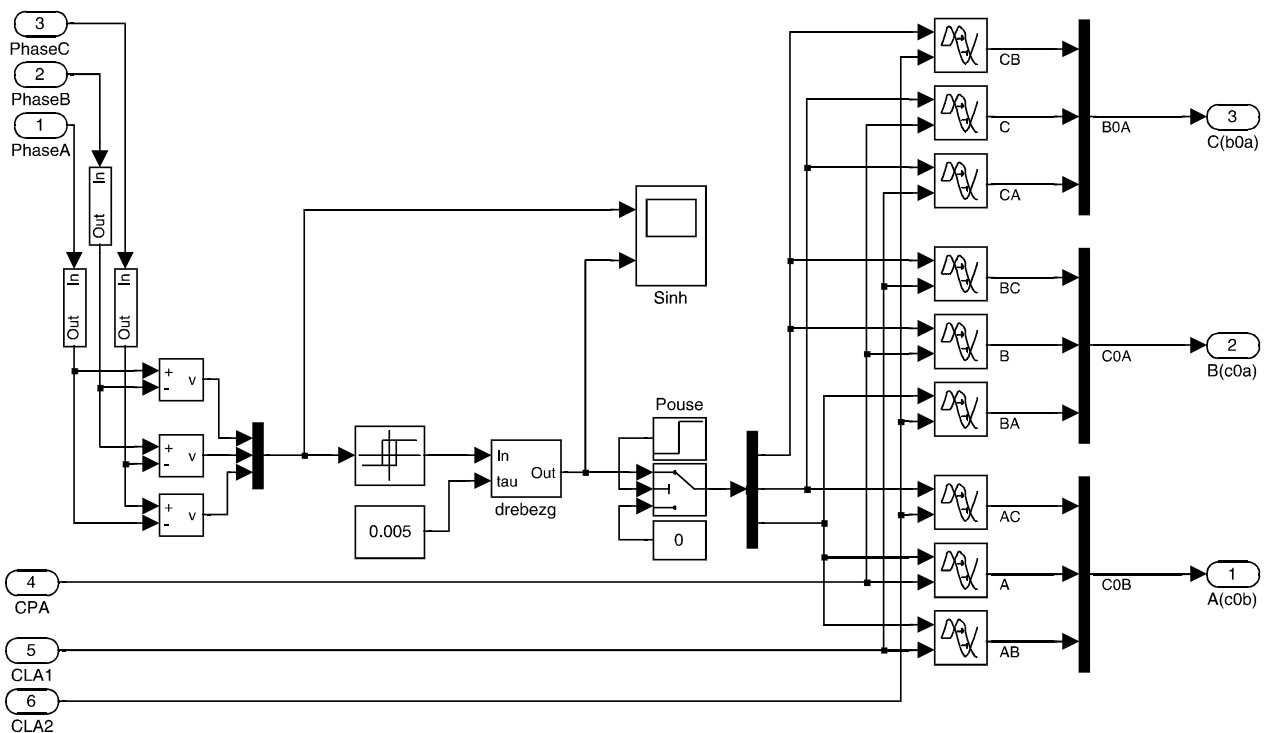


Рис. 5 – Структурная схема блока Synchronization

Первым действием, значение относительного управляющего воздействия N^* , задаваемого в процентах, преобразуется в абсолютное значение управляющего воздействия в соответствии с выражением

$$K = \frac{(100 - N^*)}{100} \cdot \frac{11}{6}.$$

Следующим действием для перехода к диапазонам изменения углов управления $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ рассчитываются значения дополнительных переменных A_1, A_2, A_3 , соответствующих этим углам, по следующим выражениям:

$$A_1 = K - 1; A_2 = K; A_3 = K - \frac{1}{3}.$$

Третьим действием ограничиваются значения полученных величин A_1, A_2, A_3 сверху и снизу в соответствии с принятыми диапазонами изменения углов управления $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, и относительные значения этих углов в долях π рассчитываются по выражениям:

$$\alpha_1^* = \begin{cases} 0, & \text{если } A_1 < 0; \\ A_1, & \text{если } 0 \leq A_1 < \frac{5}{6}; \\ 100, & \text{если } A_1 \geq \frac{5}{6}; \end{cases}$$

$$\alpha_2^* = \begin{cases} A_2, & \text{если } 0 \leq A_2 < \frac{1}{3}; \\ 100, & \text{если } A_2 \geq \frac{1}{3}; \end{cases}$$

$$\alpha_3^* = \begin{cases} 0, & \text{если } A_3 < 0; \\ A_3, & \text{если } 0 \leq A_3 < \frac{2}{3}; \\ 100, & \text{если } A_3 \geq \frac{2}{3}. \end{cases}$$

Так как на входе блока импульсно-фазового управления требуется задание углов управления в

долях секунды, то четвертым действием рассчитанные относительные значения углов α_1^* , α_2^* , α_3^* , дополнительно делятся на 100. На этом же этапе для предотвращения одновременного отпирания двух СК в одной фазе дополнительно блокируется отпирание СК S2 (тиристоры VS5 и VS6 на рис. 1), S5 (тиристоры VS11 и VS12), S8 (тиристоры VS17 и VS18), подключающих нагрузку к фазному напряжению, при максимальной мощности в нагрузке ($\alpha_1^* = 0$, $\alpha_2^* = 0$, $\alpha_3^* = 0$).

Вычисленные значения углов управления в долях секунды с выхода 3Ang1 функционального блока Angles выдаются на цифровой индикатор. Для блока импульсно-фазового управления относительный угол управления, равный единице (1 сек.), означает, что в процессе формирования кривой тока в нагрузке соответствующий СК не отпирается.

Блок импульсно-фазового управления Synchronization (рис. 5) формирует импульсы на выходах A(c0b), B(c0a), C(b0a), сдвинутые друг относительно друга на $2\pi/3$ и отпирющие СК в соответствующей фазе. Значения углов управления, рассчитанные в функциональном блоке Angles, подаются на входы CPA, CLA1, CLA2 блока Synchronization. Напряжения u_A , u_B , u_C , необходимые для синхронизации системы, подаются на входы PhaseA, PhaseB, PhaseC этого блока.

Синхронизация в блоке импульсно-фазового управления производится от трех линейных напряжений u_{AB} , u_{BC} , u_{CA} с использованием RC фильтров и блока защиты от дребезга, возникающего в момент перехода линейного напряжения через нуль (блок Drebegz). Длительность управляющих импульсов задана равной 50 мкс и может быть изменена в зависимости от особенностей работы схемы. Дополнительно в блок импульсно-фазового управления введена система блокировки формирования синхроимпульсов на время 0,01 с с момента запуска модели для исключения сбоев, возникающих в момент включения источника питания.

Для наблюдения за процессами, протекающими в ППН, в модель введен блок мультиметров Multimetr, измеряющий токи и напряжения источника питания, а также ряд осциллографов, показывающих соответственно:

- Load – токи в каждой из трех секций нагрузки;
- Sinhroniz – импульсы синхронизации для нагрузки трех фаз по отношению к току нагрузки в фазе A;
- Source – токи и напряжения в источнике напряжения;
- Sinh – процесс формирования синхроимпульсов.

Дополнительно в модель включены стандартные блоки расчета активной и реактивной мощностей потребляемых из источника в фазе А (блок A&R Power 1) и в нагрузке, непосредственно подключенной к фазе А (блок A&R Power 2), а также блок расчета энергетических показателей преобразователя (функциональный блок Energy), таких как полная и

пассивная мощности, потребляемые из одной фазы источника, и коэффициент мощности преобразователя. Все энергетические показатели выведены на соответствующие цифровые индикаторы.

Результаты исследования трехфазного тиристорного ППН с помощью разработанной модели

Исследования трехфазного тиристорного ППН с помощью математической модели, реализованной в программном пакете MatLab/Simulink, начали с анализа фазовых и регулировочных характеристик преобразователя. При этом на входе системы значение относительного управляющего воздействия N^* изменяли в диапазоне от 0 до 100 % с шагом 5 %. Кроме того, было задано еще несколько значений N^* , при которых имели место переходы от одного этапа регулирования мощности к другому. Результаты исследований в виде графиков приведены на рис. 6. Из приведенных графиков видно, что на первом этапе регулирования ($0 \leq N \leq 45,5$ %) значение относительного угла α_1^* (кривая обозначенная маркером «Δ») изменяется в диапазоне от $5/6$ до 0, а значения относительных углов управления α_2^* (кривая – «■») и α_3^* (кривая – «▲») остаются неизменными и равными 1. При этом значение относительной мощности P^* (кривая – «□») изменяется в диапазоне от 0 до 0,23.

На втором этапе регулирования ($45,5 \leq N^* \leq 81,8$ %) изменяется только значение относительного угла α_3^* в диапазоне от $2/3$ до 0, при этом значение относительной мощности изменяется в диапазоне от 0,23 до 0,68. На последнем этапе ($81,8 \leq N^* \leq 100$ %) изменяется только значение угла α_2^* в диапазоне от $1/3$ до 0, при этом относительная мощность в нагрузке увеличивается от 0,68 до 1.

Для анализа энергетических показателей ППН были исследованы зависимости относительных значений полной S^* и пассивной Q^* мощности, потребляемой преобразователем из сети, а также коэффициента мощности λ преобразователя в функции относительной активной мощности P^* в нагрузке. Результаты анализа приведены на рис. 7, где кривая с маркером «■» соответствует изменению относительной полной мощности, кривая с маркером «□» – относительной пассивной мощности, кривая с маркером «▲» – коэффициенту мощности.

Сопоставление графических зависимостей, приведенных на рис. 6 и 7, с аналогичными зависимостями, полученными расчетным путем [4], позволяет сделать вывод, что они практически идентичны. Тем не менее, некоторые отличия все же имели место, поскольку при выполнении математических расчетов в силовой схеме ППН не учитывались реактивные элементы, а также потери на ключевых и пассивных элементах схемы.

Кроме того в процессе исследований ППН с помощью разработанной модели были проанализированы осциллограммы токов в каждой секции нагрузки и в фазном проводе. Этот анализ показал, что на каж-

дом этапе регулирования согласованное управление СК обеспечивает формирование предполагаемой кривой тока в нагрузке. Имеющие на осциллограммах место всплески и провалы обусловлены реактивными элементами и коммутациями СК с реальными параметрами.

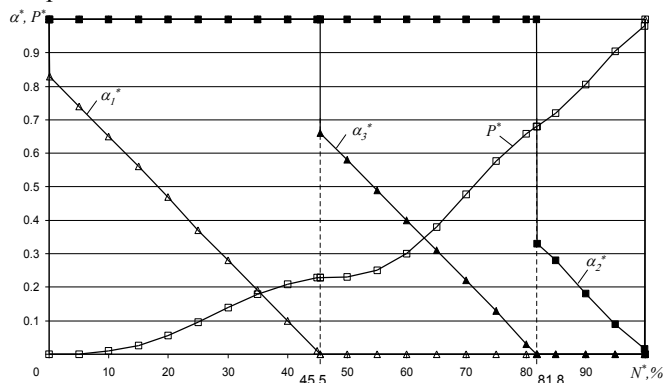


Рис. 6 – Фазовая и регулировочная характеристики трехфазного тиристорного ППН

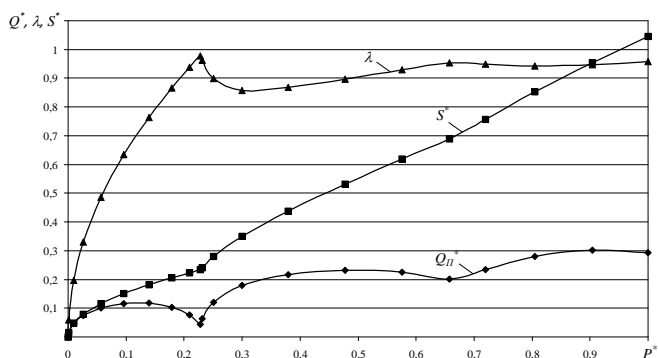


Рис. 7 – Зависимости энергетических показателей трехфазного тиристорного ППН от мощности в нагрузке

Выводы

Разработанная в программно-математическом пакете MatLab модель трехфазного тиристорного ППН, подтвердила его работоспособность при предложенном алгоритме управления и позволила определить влияние параметров питающей сети на процессы коммутации в силовой схеме преобразователя.

Исследования энергетических параметров трехфазного тиристорного ППН показали, что на трети всего диапазона регулирования мощности в нагрузке ($0,63 \leq P^* \leq 1$) коэффициент мощности преобразователя без дополнительных фильтрокомпенсирующих устройств оказывается не ниже 0,95.

В более широком диапазоне регулирования мощности в нагрузке ($0,175 \leq P^* \leq 1$) коэффициент мощности преобразователя оказывается не ниже 0,85, а в среднем – составляет 0,92.

Список литературы

1. Арендарчук А. В. Общепромышленные электропечи периодического действия / А. В. Арендарчук, А. С. Борода-

чев, В. И. Филиппов. // М.: Энергоатомиздат, 1990. – 112 с.

2. Сокол Е. И. Однофазный тиристорный регулятор температуры с секционной нагрузкой / Е. И. Сокол, И. П. Архиреев, А. В. Кипенский, Е. И. Король // *Технічна елек-тродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки*. Ч. 4. – Київ: ІЕД НАНУ, 2002. – С. 67-70.
3. Сокол Е. И. Повышение коэффициента мощности бес-трансформаторного трехфазного тиристорного преобразователя переменного напряжения с комбинированным управлением / Е. И. Сокол, И. П. Архиреев, А. В. Кипенский, Е. И. Король // *Технічна електродинаміка*. – К.: ІЕД НАНУ. – 2001. – Тематичний випуск: Силов електроніка та електроєфективність. – Ч. 2. – С. 57-60.
4. Сокол Е. И. Трехфазный тиристорный преобразователь переменного напряжения с повышенным коэффициентом мощности / Е. И. Сокол, И. П. Архиреев, А. В. Кипенский и Е. И. Король // *Технічна електродинаміка*. – К.: ІЕД НАНУ. – 2002. – Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – Ч. 1. – С. 54-59.
5. Леонов С. Ю. Энергетический анализ помех с помощью системы PSPICE. / С. Ю. Леонов, Е. В. Храпач // *Вестник ХГПУ*. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вип. 102. – С. 74-77.
6. Карлачук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. – М.: Салон-Р, 1999. – 590с.
7. Волков И.В., Способы улучшения энергетических и внешних характеристик выпрямительных установок / И. В. Волков, К. П. Акинн, Г. В. Исаков // *Технічна електродинаміка*. – Київ, 1999. – Тематичний випуск. СЕЕУіК. – С. 63-64.
8. Герман-Галкин С. Компьютерные технологии в проектировании систем компенсации в судовых электросетях / С. Герман-Галкин, П. Гринкевич // *Технічна електродинаміка*. – Київ, 2001. – Тематичний випуск. Силов електроніка та енергоєфективність. – Ч.2. – С. 89-94.
9. Шевченко И. С. Цифровое моделирование электропривода на базе реальной асинхронной машины / И. С. Шевченко, Д. И. Морозов, А. И. Карпук // *Технічна електродинаміка*. – Київ, 2002. – Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Ч.8. – С. 11-16.
10. Atan, M.A. Step-Down Three Phase Converter / M.A. Atan, Z. Othman, S.A.M. Al Junid, M.A. Haron. // *Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation* – 2012. – С. 493-497. – doi: 10.1109/ISMS.2012.89.
11. Пересада С. Станция быстрого моделирования алгоритмов управления электроприводом / С. Пересада, С. Ковбаса, А. Тониелли // *Вестник ХГПУ*. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вип. 61. – С. 190-193.
12. Липківський К. О. Фазове регулювання напруги ключами із природною комутацією та дослідження в системі MATLAB / К.О. Липківський, В. А. Халіков, А. Г. Можаровський // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки*. Ч. 2. – К.: ІЕД НАНУ, 2002. – С. 72-79.

References (transliterated)

1. Arendarchuk A. V., Borodachev A. S., Filippov V. I. Obschepromyshlennyye elektropечи periodicheskogo deystviya. - M.: Energoatomizdat, 1990. - 112 s.: il.

2. **Sokol E. I., Arhiereev I. P., Kipenskiy A. V., Korol E. I.** Odnofaznyy tiristornyy regulyator temperatury s sektsionnoy nagruzkoy. *Tekhnichna elektrodinamika. Temachniy vipusk. Problemi suchasnoyi elektrotehniki*. Ch. 4. – KiYiv: IED NANU, 2002. – S. 67-70.
3. **Sokol E. I., Arhiereev I. P., Kipenskiy A. V., Korol E. I.** Povyshenie koeffitsienta moshnosti bestransformatornogo trehfaznogo tiristornogo preobrazovatelya peremennogo napryazheniya s kombinirovannym upravleniem. *Tekhnichna elektrodinamika*. – K.: IED NANU. – 2001. – Temachniy vipusk: Silova elektronika ta elektroefektivnist. – Ch. 2. – S. 57–60.
4. **Sokol E. I., Arhiereev I. P., Kipenskiy A. V., Korol E. I.** Trehfaznyy tiristornyy preobrazovatel peremennogo napryazheniya s povyshennym koeffitsientom moshnosti. *Tekhnichna elektrodinamika*. – K.: IED NANU. – 2002. – Temachniy vipusk: Problemi suchasnoyi elektrotehniki. – Ch. 1. – S. 54–59.
5. **Leonov S. Yu., Hrapach E. V.** Energeticheskiy analiz pomesh s pomoschyu sistemy PSPICE. *Vestnik HGPU*. – Harkov: HGPU. – 2000. – Vip. 102. – S. 74 - 77.
6. **Karlaschuk V. I.** Elektronnaya laboratoriya na IBM PC. – M.: Salon-R, 1999. – 590s.
7. **Volkov I. V., Akinin K. P., Isakov G. V.** Sposoby uluchsheniya energeticheskikh i vnesnih karakteristik vyipyami-telnih ustanovok. *Tekhnichna elektrodinamika*. – KiYiv, 1999. – Temachniy vipusk. SEEUiK. – S. 63-64.
8. **German-Galkin S., Grinkevich P.** Kompyuternye tehnologi v proektirovaniy sistem kompensatsii v sudoviyh elektrosetyah. *Tekhnichna elektrodinamika*. – KiYiv, 2001. – Temachniy vipusk. Silova elektronika ta energoefektivnist. – Ch.2. – S. 89-94.
9. **Shevchenko I. S., Morozov D. I., Karpuk A. I.** Tsifrovoe modelirovanie elektroprivoda na baze realnoy assinhronnoy mashiny. *Tekhnichna elektrodinamika*. – KiYiv, 2002. – Temachniy vipusk. Problemi suchasnoyi elektrotehniki. Ch.8. – S. 11-16.
10. **Atan, M.A., Othman Z., Al Junid S.A.M., Haron M.A.** Step-Down Three Phase Converter. *Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation* – 2012. – C. 493-497. – doi: 10.1109/ISMS.2012.89.
11. **Peresada S., Kovbasa S., Tonielli A.** Stantsiya byistrogo modelirovaniya algoritmov upravleniya elektroprivodom. *Vestnik HGPU*. – Harkov: HGPU. – 1999. – Vip. 61. – S. 190-193.
12. **Lipkivskiy K. O., Hallkov V. A., Mozharovskiy A. G.** Fazove regulyuvannya naprugi klyuchami Iz prirodnoy komutatsiyei ta doslidzhennya v sistemі MATLAB. *Tekhnichna elektrodinamika. Temachniy vipusk. Problemi suchasnoyi elektrotehniki*. Ch. 2. – K.: IED NANU, 2002. – S. 72-79.

Сведения об авторах (About authors)

Кипенский Андрей Владимирович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Промышленная и биомедицинская электроника»; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0002-4589-092X; e-mail: kavkpi@ukr.net.

Andrii Kipenskiy – Ph. D. degree, Professor, Professor, Department of physical and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4589-092X; e-mail: kavkpi@ukr.net.

Король Евгений Игоревич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Промышленная и биомедицинская электроника»; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0001-9010-8979; e-mail: korolei76@gmail.com.

Ievgen Korol – Ph. D. degree, Docent, Associate Professor, Department of physical and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-9010-8979; e-mail: korolei76@gmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Кипенский, А. В. Моделирование процессов в трехфазном тиристорном преобразователе переменного напряжения с фазоступенчатым регулированием выходной мощности / **А. В. Кипенский, Е. И. Король** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 84-91. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.12.

Please cite this article as:

Kipenskiy, A., Korol, I. Modelling of processes in the AC-voltage three-phase thyristor converter with phase-step regulation of output power. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **20** (1345), 84-91, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.12.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Кипенский, А. В. Моделювання процесів в трифазному тиристорному перетворювачі змінного напруги з фазоступенчатим регулюванням вихідної потужності / **А. В. Кипенский, Е. І. Король** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 84-91. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.12.

АНОТАЦІЯ. В роботі поставлена задача створення моделі трифазного тиристорного перетворювача змінної напруги з мікропроцесорною системою імпульсного управління. Для вирішення цього завдання були проаналізовані можливості різних програмних засобів. В якості основи для створення моделі обраний програмно-математичний пакет MatLab. Модель, що запропоновано, містить три основні частини: систему енергопостачання, силову частину перетворювача і систему управління. Дослідження перетворювача змінної напруги за допомогою моделі підтвердили його працездатність, дозволили визначити вплив параметрів мережі живлення на процеси комутації в силовій схемі, показали, що перетворювач має підвищеним коефіцієнтом потужності.

Ключові слова: тиристорний перетворювач; трифазна живить мережу; програмно-математичні пакети; моделі; фазові і регулювальні характеристики; енергетичні показники

Надійшла (received) 19.07.2019